

報告 広幅員床版を有する PC 箱桁橋の施工上の課題と対策

渡辺 将之*1 ・ 福永 靖雄*2 ・ 石井 祐二*3 ・ 加藤 大典*4

要旨:第二東名高速道路は片側3車線の広幅員(17.5m)を有している。そのため従来の構造物と比較して各部材寸法が大きくなり、設計・施工時において新たな検討が必要となっている。本報文中では、第二東名天竜川橋での実施例の中から、柱頭部の温度ひびわれ対策と橋軸直角方向の温度応力や乾燥収縮が床版に及ぼす影響の把握とその対策について報告する。柱頭部の温度ひびわれ対策では、打設割りとセメント種別の工夫により品質と工程の両方を確保しつつ、ひびわれの発生を防ぐことができた。また、橋軸直角方向の温度応力や乾燥収縮が及ぼす影響については、今後の設計・施工に反映できる知見が得られた。

キーワード: 温度応力, 乾燥収縮, ひびわれ, 床版, PC 橋, 外ケーブル, 広幅員

1. はじめに

第二東名高速道路天竜川橋は、橋長 1585.5m の PC23 径間連続箱桁橋 (図1) である。同型式における連続橋としては国内最大規模を誇り、主桁連結後の支承のひずみ調整や伸縮装置の構造等に工夫を行っている。本橋梁は基本設計時点では内外ケーブル併用方式で設計が実施されていたが、詳細設計時に全外ケーブルによる張出し架設工法に変更されている。外ケーブル方式は内ケーブル方式と比較して大容量のケーブルを用いることから、定着システムを含めた定着体自体の安全性はもとより、定着部周辺の本

体構造の安全性が重要となる。そこで詳細設計時に各部材に発生する応力を FEM 解析にて確認するとともに、実物大模型によるケーブル緊張試験、せん断力載荷試験を実施し、設計の妥当性と構造の安全性について検証している¹⁾。

また第二東名高速道路は図2に示すように広幅員(有効幅員 16.5m, 床版支間約 9.0m)を有していることから、床版の設計においても活荷重載荷状態を変化させた FEM 解析を実施している。しかし、このような広幅員を有する大断面の 1 室箱桁橋の設計・施工実績は少なく、

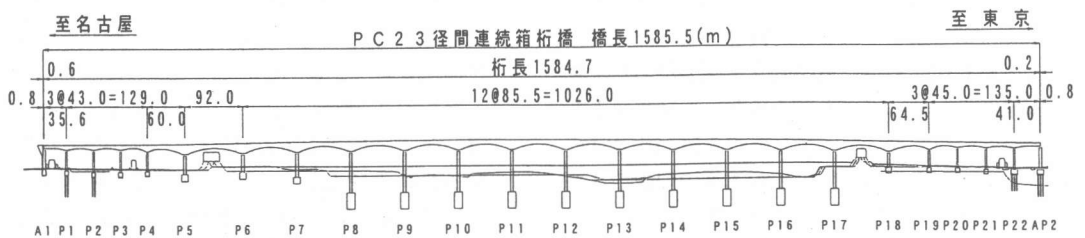


図1 第二東名高速道路 天竜川橋 側面図

*1 日本道路公団 静岡建設局 浜松工事事務所 浜北東工事長 (正会員)

*2 日本道路公団 静岡建設局 建設部 構造技術課 課長代理

*3 第二東名高速道路天竜川橋 (PC 上部工) 工事

住友建設 (株)、極東工業 (株)、コーアツ工業 (株) 共同企業体 設計課長 (正会員)

*4 同 上 設計主任

施工時において設計上考慮されていない様々な課題が生じている。本報文ではそれらの課題のうち、柱頭部マスコンクリート対策および橋軸直角方向の温度応力や乾燥収縮が床版に及ぼす影響とその対策について報告する。図3には天竜川橋の施工状況を示す。

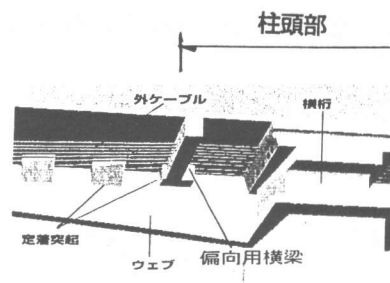


図4 柱頭部 側面図

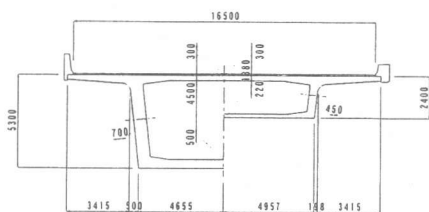


図2 第二東名高速道路標準断面図

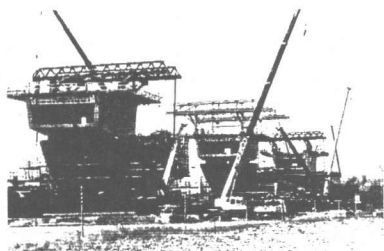


図3 施工中の天竜川橋

2. 柱頭部マスコンクリート対策

2.1 柱頭部の構造概要

柱頭部は中心桁高 5.3m、橋軸方向施工長 15.0m、横桁厚 4.0mである。図4に側面図を示す。図4に示すように、柱頭部には外ケーブルの定着突起および角度偏向用横梁があり、複雑な構造となっている。そのため、柱頭部1箇所当りのコンクリートボリュームは約430m³であるが、上床版支保工の設置等の理由からコンクリート打設は2回に分けて実施しなければならない。コンクリート種別は、主桁本体工と同じ早強コンクリート（設計基準強度 40N/mm²）を用いている。なお、配合強度は寒中施工時でも PC 鋼材緊張必要強度が早期に確保できるように 57N/mm² としている。

2.2 事前検討

柱頭部はマスコンクリートで、コンクリート打設が複数回となることから、施工前にマスコ

ンクリート対策の検討を行った。マスコンクリート対策としては、構造体の水和反応による発熱を極力抑えるか、構造体内部と表面付近の温度差が小さくなるよう養生を行うなどの方法が一般に採用される。構造体の水和反応にともなう温度上昇を極力抑えるためには、打設時のコンクリート温度を規範囲内なるべく低くするか、高炉セメントB種や中庸熱セメントなどの低発熱系のセメントを用いる方法が考えられる。しかし、本工事は渇水期（10月～5月）に施工されることから、打設時のコンクリート温度は15℃程度と低い傾向にあり、また柱頭部横方向の設計において横締めPC鋼材（1S28.6、10本、プレグラウト鋼材）が必要となることから、早期にPC鋼材の緊張に耐えられるコンクリート強度発現が要求される。そのため、初期強度発現の遅い低発熱系のセメントを用いることは工程管理上好ましくないと判断された。また養生については、横桁部には外ケーブル通過用の孔（φ170～φ190mm程度）が約30箇所開いており、通風による冷却作用で発熱上昇量を抑える構造となっていた。

そこでコンクリート種別は早強のままとし、コンクリートの打設温度に注意しながら、温度ひびわれの発生しやすいと思われる図5に示す位置に補強筋（D13、18本）を設置し、ひびわれ抑制対策とした。

2.3 施工状況

上記対策のもと、図5に示す位置で打継ぎ目をつけて打設を2回にわけ実施した。第一打設と第二打設の間隔は30日間であった。第二打設完了後所定の養生を行い、5日目に脱型したところウェブの打継ぎ目付近に斜め方向のひびわれの発生が確認された。コンクリートの配合、

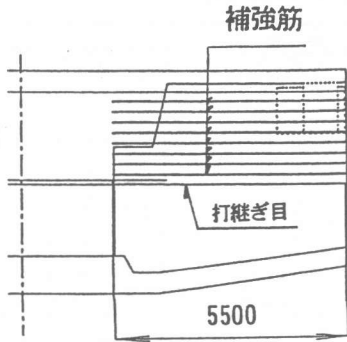


図5 補強筋及び打継ぎ位置

材料、強度発現、支保工の強度・たわみなどに問題が無かったことから、ひびわれの原因は温度応力によるものと推察された。

2.4 原因検討

ひびわれ発生の原因を調査する目的で、柱頭部内部温度の計測と簡略的な3次元立体FEM解析（ウェブ部分が周囲と-10℃の温度差が生じた場合の応力解析）を行った図6および図7に柱頭部横桁中心部の温度計測結果を示す。

これらから、第一打設部、第二打設部とも最大70℃程度まで内部温度が上昇しているのが分かる。また、温度上昇及び下降の傾向が第一打設部と第二打設部で異なる傾向を示しているが、これは第二打設部が第一打設部の内部温度および外気温の影響を受けたためと考えられる。第二打設部が最大温度に達する時点で第一打設部はほぼ外気温であり、温度応力によるひびわれが発生しやすい状況であったといえる。またFEM解析結果では、ウェブ内側の橋軸方向に局部で最大1.47N/mm²、平均的には1.0N/mm²の引張応力が生じていることが分かった。

2.5 対策と結果

計測及び検討結果をもとに、鉄筋の発生応力を147N/mm²（使用限界状態における許容ひびわれ幅0.005C相当）までに抑えるよう鉄筋量を増加させ対応することとした。しかし、この補強筋対策は、ひびわれ箇所数および最大ひびわれ幅を抑えることはできたものの、完全にひびわれをなくすまでにはいたらなかった。そこ

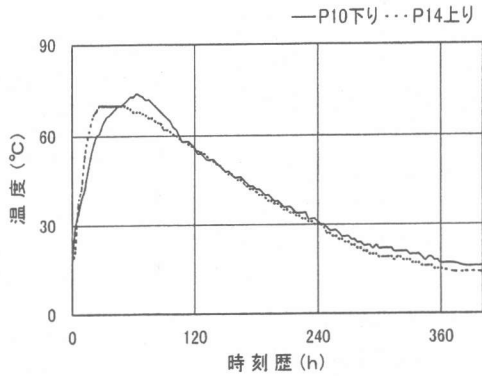


図6 第一打設部温度計測結果

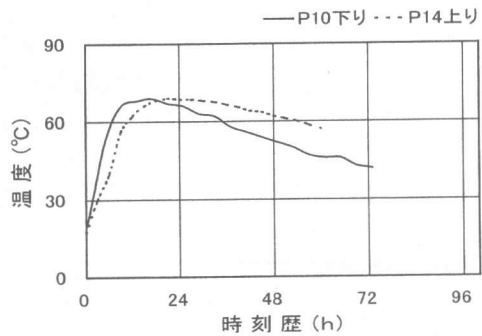


図7 第二打設部温度計測結果

で、打設割りおよび使用セメント種の変更を検討することとした。コンクリートの温度履歴、強度発現履歴、発生応力履歴を考慮したFEM解析を打設割りと使用セメント種別を変化させて実施した。打設割りおよび使用セメント種別は、実施工実施の可能性がある早強セメント・2回打設と普通セメント・3回打設の2通りとした。表1および図8に解析条件を示す。

図9は普通セメント・3回打設の場合のコンクリート内部温度分布図である。横桁部では多少の温度差はみられるものの、ウェブにおいては温度差が小さくなっているのが分かる。

図10と図11は橋軸方向応力分布図であるが、早強セメント・2回打設の場合、ウェブの打継ぎ目部で2.0~2.5N/mm²、横桁とウェブの境界付近で4.0~4.5N/mm²の大きな引張応力が発生している。一方、普通セメント・3回打設はウェブに同様の引張応力が発生しているものの、横桁とウェブ境界付近の高い引張り応力は改善されているのが分かる。

これらの結果から、打設割りおよび使用セメント種別を早強セメント・2回打設から普通セメント・3回打設に変更することとした。またウェブに発生している応力については残っていることから、補強筋(D22, 8本)をウェブ全断面に均等に配置し対応することとした。以上の結果、柱頭部のひびわれ発生を制御することが可能となった。

表1 FEM解析条件

解析ケース	早強・2回ケース	普通3回ケース			
セメント種類	早強セメント	普通セメント			
コンクリート強度	40.0 N/mm ²				
打設回数	2回	3回			
打設設定	打設日	打込温度	外気温	打設間隔	
	第1リフト	9/15	27.0℃	27.4℃	—
	第2リフト	10/5	25.0℃	21.3℃	20日
第3リフト	10/20	22.0℃	17.7℃	15日	
外気温履歴	昨年の計測データ(下表2参照)				
配合	Ww	148 kg/m ³	148 kg/m ³		
	Wc	379 kg/m ³	387 kg/m ³		
	Ws	686 kg/m ³	684 kg/m ³		
密度	2343 kg/m ³		2347 kg/m ³		
配合強度	57.0 N/mm ²		57.0 N/mm ²		
熱伝達率	2.7 W/m℃		2.7 W/m℃		
比熱	1.293 kJ/kg℃		1.291 kJ/kg℃		
断熱温度上昇特性	Q _∞	61.3℃	55.6℃		
	γ	1.598	1.435		
線膨張係数	10×10 ⁻⁶				
ポアソン比	0.167				

コンクリートの強度発現特性、弾性係数発現履歴、クリープ性状等については、『コンクリート標準示方書[設計編]、[施工編]、H8年版』を準拠。

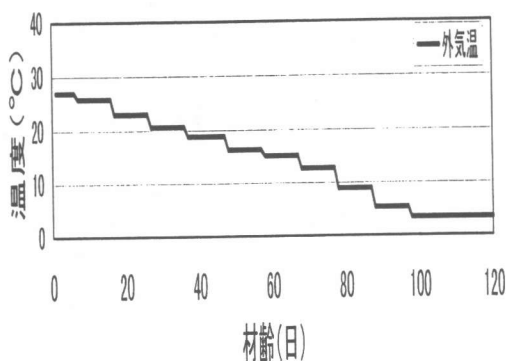


図8 外気温履歴

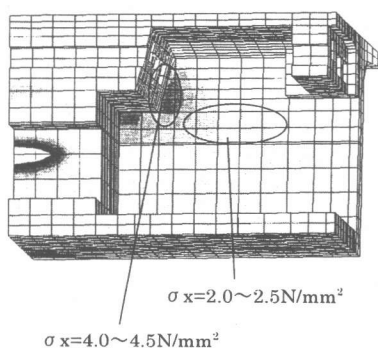


図10 橋軸方向応力分布図
(早強, 2回打設)

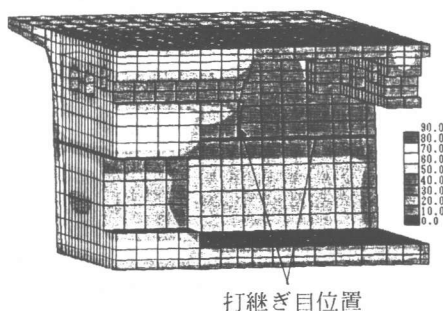


図9 内部温度分布図
(普通, 3回打設)

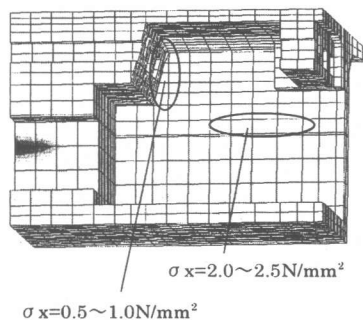


図11 橋軸方向応力分布図
(普通, 3回打設)

3. 張出し床版先端の応力改善

3.1 詳細設計時の検討

第二東名天竜川橋では1回の張出し(1ブロックの長さ約3.0m程度)においてPCケーブル(19S15.2)2本をウェブ内側に設置された定着部において緊張し張出していく。そのため床版先端付近ではプレストレス力が伝達しにくい構造となっている。そこで仮に4mずつ張出し施工を行ったと想定した場合の床版上縁応力分布状況をFEM解析で求めた。

その結果、図12および表2に示すように1ブロック目では棒理論解析値の約20%、3ブロック目では95%という値になっている。張出し床版先端部ではこれらの応力が重ね合わせで累積されていくため、3ブロック張出した時点で柱頭部付近の床版上縁では棒理論値と比較して0.84N/mm²の応力度が不足していることになる(図13)。

そこで、張出し床版先端部分にPC鋼材(3S15.2、片側1本)を設置することにより応力度の改善を図ることとした。

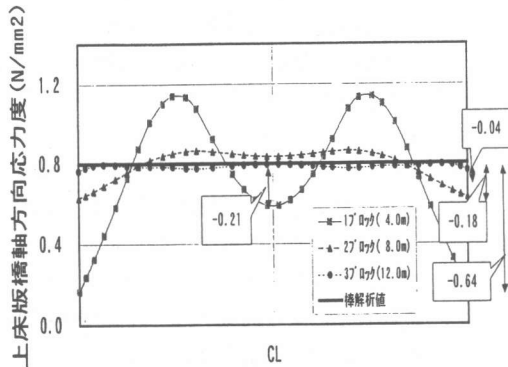


図12 床版上縁応力分布

表2 床版先端部の応力度比較

	FEM解析値	棒理論解析値	差	差/棒理論解析値
	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(%)
1BL	0.16	0.80	0.64	80
2BL	0.80	1.60	0.80	50
3BL	1.56	2.40	0.84	35

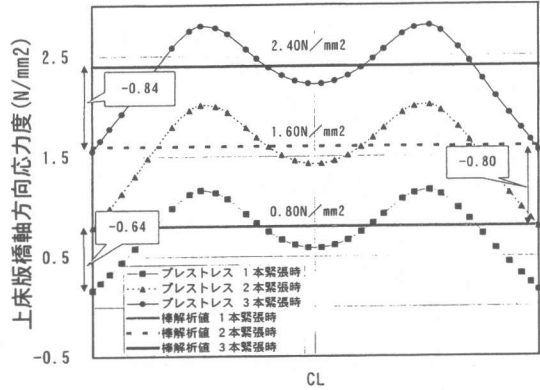


図13 床版上縁応力度分布(累積)

3.2 施工後の状況

実施工では3ブロック目施工中に、図14に示す床版上面のひびわれが発見された。このひびわれは時間とともに進展しており、ひびわれの方向が橋体を中心方向に引っ張るような傾向を示していることから、原因としては図15に示すような温度応力、乾燥収縮等がブロック打継ぎ目部に働いたものと推察された。

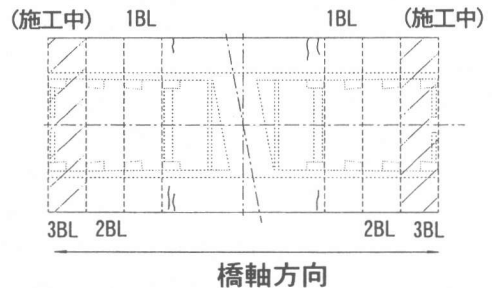


図14 ひびわれ状況

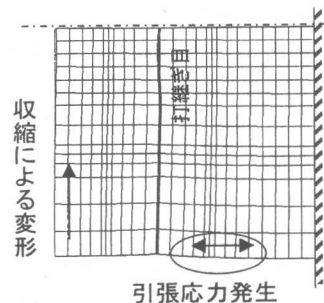


図15 ひびわれ原因推定図

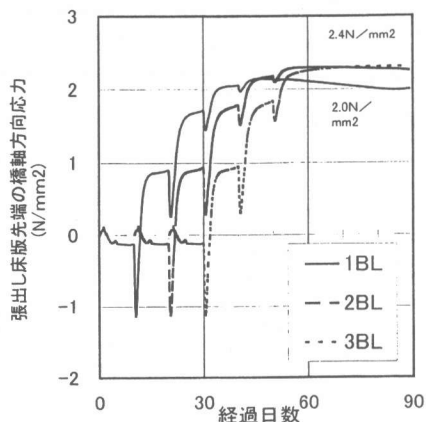


図16 床版端部橋軸方向応力
(広幅員の場合)

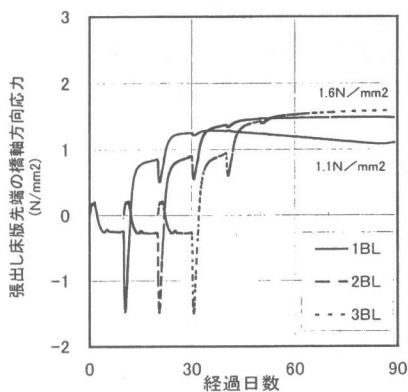


図17 床版端部橋軸方向応力
(一般幅員の場合)

3.3 原因と対策

通常の設計においては橋軸直角方向の温度応力の影響や乾燥収縮、自己収縮の影響は無視できる程度であるため設計時に照査することは稀である。しかし、第二東名高速道路のように横断方向に広い構造物はそれらの影響が大きいことが分かった。図16は橋軸直角方向の温度応力および乾燥収縮を考慮した床版端部橋軸方向応力のFEM解析結果であるが、予想以上に大きな応力が働いているのが分かる。

また図17に示す結果は、地方の高速道路の標準的な幅員(11.0m程度)における上記応力状態であるが、1.1~1.6N/mm²の引張応力が働いている。従来の設計・施工では内外ケーブル併用であったため、張出し床版先端付近にPC鋼材が設置されていた。そのためこの引張応力は改善されていたものと思われるが、全外ケーブル方式に変更したためこの応力を打ち消すプレストレスが不足したものと考えられる。そこで、張出し床版先端付近にPC鋼材(1S28.6, プレグラウト鋼材)を配置し対応することとした。その結果、床版先端付近のひびわれ発生を完全に防ぐことが可能となった。

4. まとめ

第二東名高速道路天竜川橋での設計・施工検討結果から広幅員を有するPC箱桁橋の設計施工

上の留意点(以下に示す)を把握することができた。また全外ケーブル方式による床版先部の応力度状況の把握とその対策について検討、実施することができた。これらの検討結果は、第二東名高速道路のように広幅員を有する橋梁の設計・施工に今後多いに活かされていくものと期待される。

- ① PC上部構造物のように、初期強度発現が工程等へ及ぼす影響が大きい場合、マスコンクリート対策としては、打設割りを増やし普通コンクリートを用いることが有効である。
- ② 全外ケーブル方式では床版端部への応力伝達が遅れるため、各施工段階でPC鋼材を設置し応力度改善が必要である。
- ③ 広幅員の場合、橋軸直角方向の温度応力、乾燥収縮により前施工部の床版端部に大きな引張応力を発生させる。

参考文献

- 1) 福永靖雄, 渡辺将之: 広幅員床版を有するPC箱桁橋の設計検討 - 第二東名高速道路・天竜川橋(全外ケーブル方式による片持ち張出し架設) -, ハイウエイ技術, No. 17, pp. 153-163, 2000. 10